

**Анатолий ПАЛЬЧИК<sup>1</sup>**  
**Катерина ДОДУХ<sup>2</sup>**

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ**

В работе представлен метод расчета практической пропускной способности полосы движения автомобильной дороги. В результате увеличения интенсивности движения на автомобильных дорогах Украины, возникла необходимость проведения анализа условий движения и разработки мероприятий по их улучшению.

Самым методом решения этих задач является проведение анализа условий движения на основе графика практической пропускной способности участка автомобильной дороги. На его основе решается вопрос частичной или полной ее реконструкции. Под частичной реконструкцией понимаем увеличения пропускной способности на отдельных участках или элементах дороги.

Практическая пропускная способность - это максимально возможная интенсивность движения в сечении дороги за единицу времени в конкретных дорожных условиях.

Конкретным дорожным условиям соответствует средняя скорость транспортного потока, а каждой средней скорости транспортного потока соответствует практическая пропускная способность полосы движения.

Практическая пропускная способность применяется при: определении необходимого количества полос движения на автомобильных дорогах, проведении оценке условий движения на автомобильных дорогах, обосновании необходимости проведения реконструкции автомобильной дороги или отдельных ее участков, расчета продолжительности цикла светофорного регулирования движения автомобилей на пересечениях и примыканиях, автоматизированном регулировании дорожного движения по дороге, координированном регулировании движения. Практическая пропускная способность изменяется от наименьшего значения к наибольшему. Наименьшая практическая пропускная способность соответствует колонному движению автомобилей при средней скорости транспортного потока. Наибольшая практическая пропускная способность соответствует колонному движению автомобилей при минимальном интервала (времени проезда динамического габарита). Границы изменения практической пропускной способности полосы движения определяются средней скоростью свободного движения и средней скоростью соответствующей минимальному часовому интервалу.

**Ключевые слова:** практическая пропускная способность, полоса движения, состав транспортного потока, средняя скорость движения транспортного потока

### **1. ВСТУПЛЕНИЕ**

Существует три понятия пропускной способности: теоретическая, практическая и максимальная. Теоретическая пропускная способность определяется на основе

---

<sup>1</sup> Пальчик Анатолий, профессор кафедры проектирования дорог, геодезии и землеустройства, Национального транспортного университета, ул. Суворова, 1, Киев, 01010, Украина, pdkaf@ukr.net

<sup>2</sup> Додух Екатерина, магистр (соответствующий автор), ассистент кафедры проектирования дорог, геодезии и землеустройства Национального транспортного университета, ул. Суворова, 1, Киев, 01010, Украина, ekaterinadodukh@gmail.com

упрощенных динамических моделей транспортного потока. Дистанция между автомобилями, как и динамический габарит зависит от коэффициента сцепления и скорости движения в этих моделях. Длина легкового автомобиля величина постоянная, не соответствует физическому процессу (длина легкового автомобиля меняется в значительном интервале от 2.5м до 5.5м). Итак, теоретическая пропускная способность изменяется в значительной интервале. Этой пропускной способности соответствует ее определения: это максимально возможная интенсивность движения в пересечении дороги в единицу времени.

Максимальная пропускная способность определяется для участка дороги второй категории: горизонтальная, прямолинейная, ширина проезжей части 7,5 м, ширина обочины 3,75. Как видно из этого объяснения, речь идет о пропускной способности легковых автомобилей на участке дороги второй категории при конкретных дорожных условиях соответствует определению практической пропускной способности.

На рисунке 1.1 представлен график изменения пропускной способности в зависимости от скорости транспортного потока.

Линия ABC и линия A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> характеризуют изменение практической пропускной способности соответственно для легковых и грузовых автомобилей. Каждому значению скорости движения соответствуют различные режимы движения транспортного потока от свободного к колонного и изменение интенсивности движения от 1 до P авт./ч.

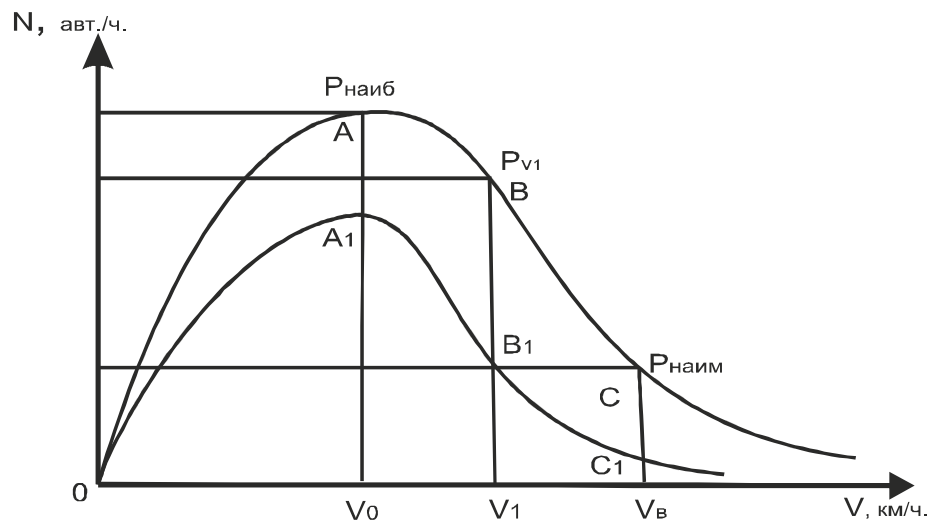


Рис. 1. График изменения пропускной способности в зависимости от скорости транспортного потока

$V_0$  - средняя скорость движения, соответствующая наименьшему интервалу

$V_{\dot{a}}$  - средняя скорость свободного руху движения

$V_1$  - средняя скорость

Зависимость “интенсивность – скорость” в гидродинамической модели приведена на рисунке 2.

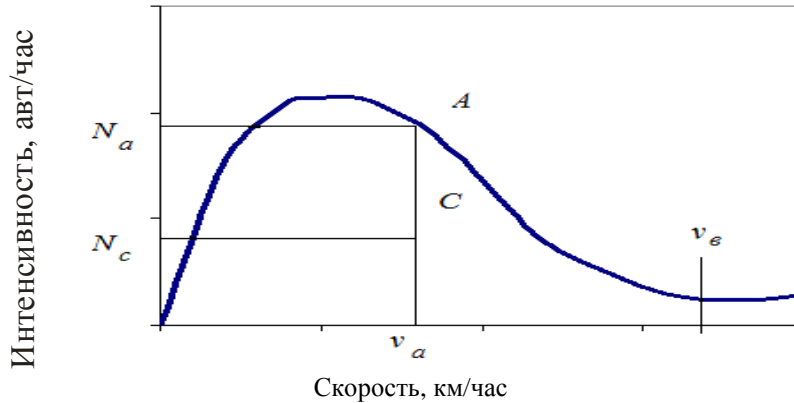


Рис. 2. Зависимость “интенсивность – скорость” в гидродинамической модели

По графику (рис. 2) видно, что каждому значению интенсивности движения соответствует определенное значение скорости. Например, в точке А максимальная интенсивность движения  $N_a$  соответствует скорости движения  $V_a$ , а в точке С скорость движения будет та же, а интенсивность  $N_c$  будет меньше чем  $N_a$ .

На самом деле следует рассматривать только одну пропускную способность - максимально возможное количество автомобилей, которое может пройти в пересечении дороги в единицу времени при данном составе транспортного потока.

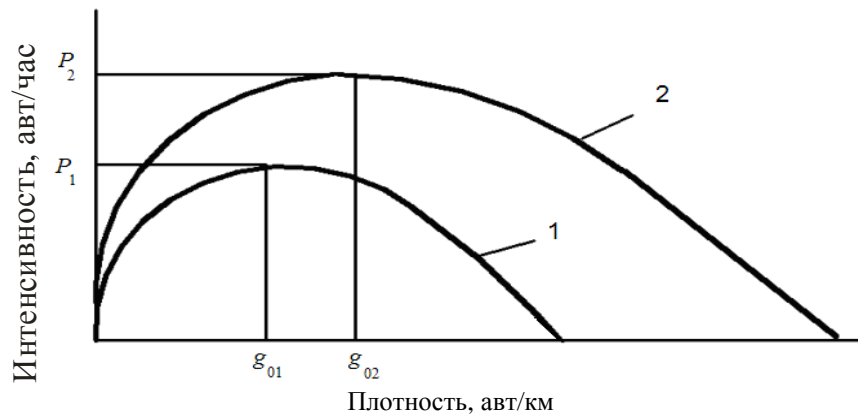


Рис. 3. Зависимость “интенсивность - плотность” для автопоездов (кривая 1) и для легковых автомобилей (кривая 2). Все другие автомобили по своей средней длине располагаются между линиями 1 и 2. Минимальная длина легкового автомобиля равна 4,5 м, - отвечает линии 2, а длина авто поезда - 12 м соответствует линии 1.

Значение практической пропускной способности меняется не только от минимального значения до максимального, а для одной скорости движения она меняется на величину среднеквадратического отклонения, что хорошо видно из рисунка 4.

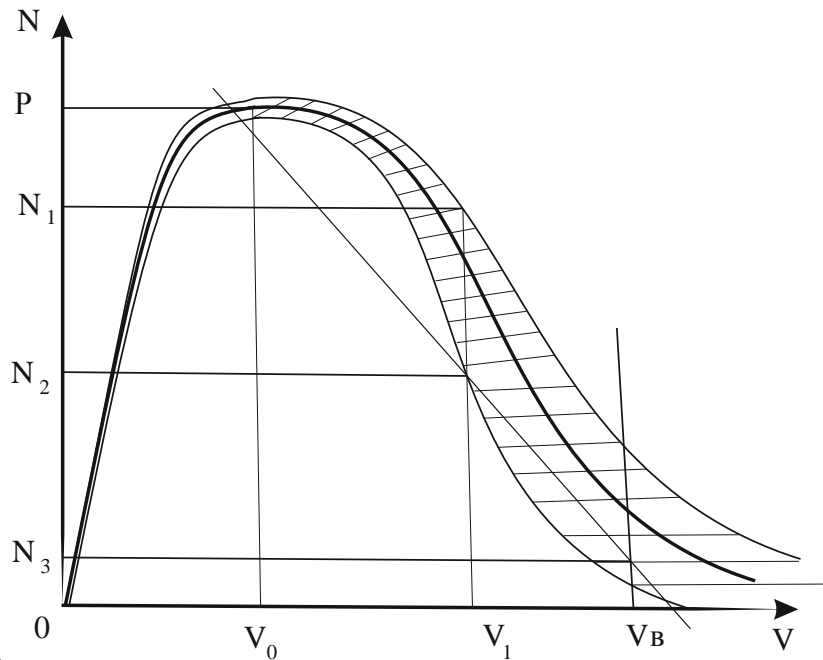


Рис. 4. Изменение практической пропускной способности для одной скорости движения на величину среднеквадратического отклонения

$V_B$  – скорость свободного движения ;

$V_1$  – средняя скорость движения ;

$N_1$  – интенсивность при колонном движении автомобилей соответственно скорости  $V_1$  ;

$N_2$  – интенсивность движения при скорости  $V_1$ , но меньше  $N_1$  ;

$N_3$  - интенсивность соответствующая скорости свободного движения.

Прямолинейная зависимость имеет достоверные значения по интервалу скорости от  $V_1$  до  $V_B$  и интервала интенсивности от  $N_2$  до  $N_3$ .

## 2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПО РАСЧЕТА ПРАКТИЧЕСКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Практическая пропускная способность может быть рассчитана на основе:

- функциональных зависимостей, основанных на моделях транспортного потока ;
- коэффициентов снижения теоретической пропускной способности;

-функциональных зависимостей полученных при исследовании характеристик транспортного потока.

Весь комплекс функциональных зависимостей можно разделить на следующие группы :

- 1). Функциональные зависимости упрощенных динамических моделей ;
- 2). Функциональные зависимости гидродинамической модели, следования за лидером ;
- 3). Прямолинейные зависимости „интенсивность-скорость” ;
- 4). Функциональные зависимости на основе исследований „интенсивность-скорость”

В работе рассмотрены следующие зависимости на основе моделей транспортного потока по связи характеристик „интенсивность-скорость”:

- упрощенные динамические модели ;
- модель следования за лидером ;
- гидродинамическая модель ;
- модель Бирули А.К.;
- модель Трибунского В.М.

Для проведения детального анализа расчета практической пропускной способности взято участок автомобильной дороги Козелец - Бобровица. Дорога IV категории. Интенсивность движения 98 авт/ч. Состав транспортного потока : 40% легковых автомобилей, 50% грузовых автомобилей и 10% автобусов. Длина участка – 4 км, из них 2 км по населенному пункту и 2 км вне населенного пункта. Скорость проезда и радиусы горизонтальных кривых определены на основе технологии GPS, а ширина проезжей части, обочины и расстояние видимости на основе замеров.

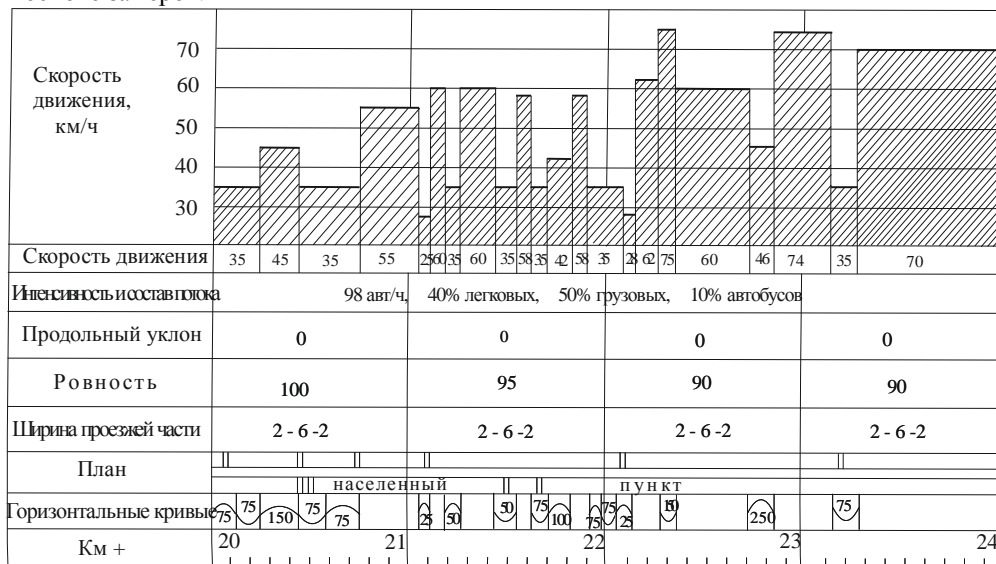


Рис. 5. График скорости движения по автомобильной дороге Козелец - Бобровица

Таблица 1. Сравнительная таблица практической пропускной способности

Скорость движения, км/ч	Первая динамическая модель	Вторая динамическая модель	Третья динамическая модель	Гидродинамическая модель	Упрощенная динамическая модель (Бируля А.К.)	Модель следования за лидером Сильянова В.В.	Трибунский В.М.	Чехия	Германия	Хомяк Я.В.	Белятинский А.А.
27	1432,3	989,4	1279,6	1251,6	1224,9	1365,2	1408,7	725	713	2089,7	2453
28	1464,4	992,5	1299,2	1247,2	1220,6	1389,3	1408,9	725	713	2016,2	2392,1
33	1608,1	995,9	1381,7	1204,2	1188,9	1481,6	1355,4	725	713	1648,5	2087,2
36,8	1706,0	988,2	1429,2	1154,0	1157,7	1520,1	1254,1	725	713	1369,1	1855,5
39,5	1769,7	978,4	1872,0	1112,2	1133,3	1530,8	1150,2	725	713	1170,6	1690,9
43,8	1862,2	957,6	1487,5	1039,0	1092,8	1519,5	930,17	725	713	854,41	1428,7
49,7	1976,1	925,2	1516,7	931,81	1037,5	1447,1	519,0	725	713	420,59	1068,9
56,9	2095,7	880,8	1532,2	800,55	972,2	1269,6	153,8	725	713	108,8	629,88
58	2112,1	873,6	1532,7	781,00	962,52	1233,9	273,1	725	713	189,7	562,8
59	2126,8	867,2	1533,0	763,41	953,8	1199,4	385,5	725	713	263,2	501,83
72,4	2301,3	785,9	1519,8	549,00	848,20	555,0	2241	725	713	1249	315,2

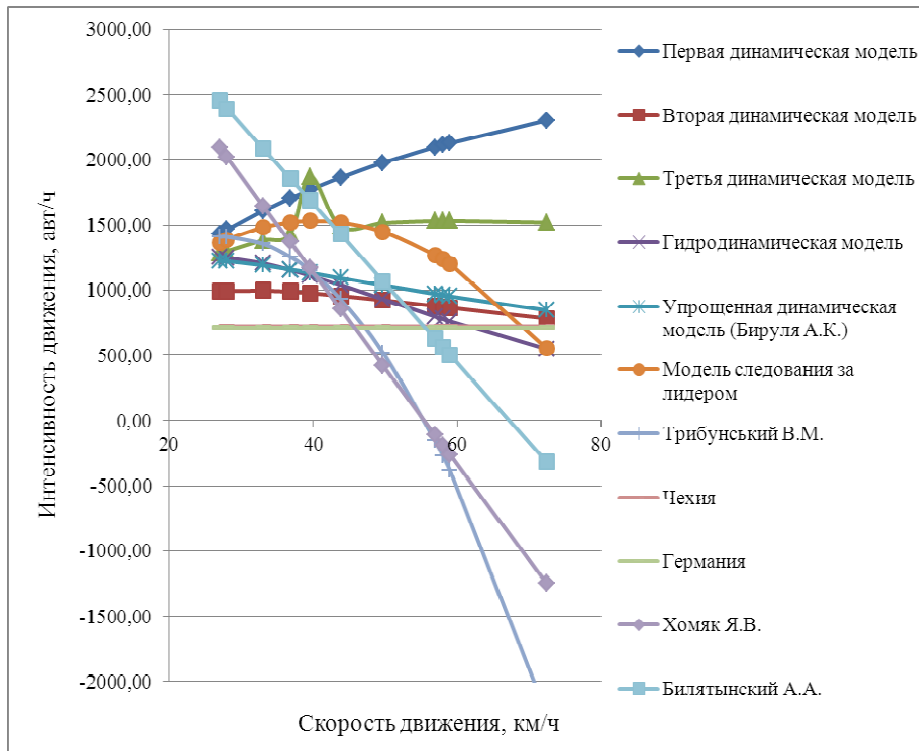


Рис. 6. График функциональных зависимостей „интенсивность - скорость” на основе сравнительной таблицы

Рассчитав пропускную способность для скоростей от 20 до 90 км / ч, видим большое расхождение значений пропускной способности для одного значения скорости. Поэтому нужно найти зависимость, которая наиболее точно отражала физический смысл движения транспортного потока.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

В условиях высокой интенсивности движения большое значение приобретают вопросы оценки транспортно-эксплуатационных качеств дорог с позиций пропуска потоков автомобилей. Средняя скорость движения является основным параметром для оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги. Скорость движения можно установить путем непосредственных измерений на отдельных участках дороги или путем расчетов.

Для определения практической пропускной способности автомобильной дороги нужно определить среднюю скорость движения транспортного потока на всех участках автомобильной дороги. Пропускная способность прямо пропорционально зависит от средней скорости транспортного потока. Есть несколько методов по определению средней скорости движения транспортного потока на автомобильной дороге:

1. Метод на основе интенсивности движения, состава транспортного потока и геометрии дороги

2. Метод линейных зависимостей от интенсивности движения, состава транспортного потока, ширины проезжей части, ширины обочины и т.д.

3. Метод определения минимальной скорости в зависимости от интенсивности движения, категории дороги, радиусов горизонтальных кривых, продольных уклонов и ровности покрытия.

4. Методы основанные на уравнении регрессии с учетом интенсивности и параметров дороги.

Из проведенного анализа практически во всех методах за основу принимается средняя скорость свободного движения. В связи с чем возникает необходимость по проведению исследований по скорости свободного движения автомобилей в различных дорожных условиях и разном составе транспортного потока.

В результате статистической обработки экспериментальных данных и теоретических функций распределения интервала времени и интенсивности движения получены значения средней свободной скорости движения для различного состава транспортного потока на дорогах разных категорий .

Полученные результаты занесены в таблицы и обработаны по закону нормального распределения Лапласа Гаусса.

Таблица 2. Средние скорости свободного движения

№ п/п	Категория дороги	Количество полос движения	Средняя скорость, км/ч			
			Легковые	Грузовые	Автобусы	Автопоезда
1	Ia	6	91,13	75,70	77,50	81,03
2	Ia, Ib	4	88,04	75,77	74,61	80,00
3	II	2	84,29	71,90	71,50	72,93
4	III	2	79,72	67,06	69,33	71,11
5	IV	2	75,83	64,08	67,03	68,75

Среднюю скорость свободного движения транспортного потока определяют как среднестатистическое значение по формуле (1) :

$$V_{своб} = V_{л} \times \alpha + V_{г} \times \beta + V_{ав} \times \gamma + V_{ап} \times \rho, \quad (1)$$

где  $V_{л}, V_{г}, V_{ав}, V_{ап}$  - соответственно средние скорости свободного движения легковых, грузовых автомобилей, автобусов и автопоездов, км / ч., данные берутся из таблицы 2;

$\alpha, \beta, \gamma, \rho$  - доли соответственно легковых, грузовых автомобилей, автобусов и автопоездов в транспортном потоке.

Были проведены экспериментальные исследования средней скорости транспортного потока в зависимости от параметров дороги на дорогах II, III, IV категорий. Замеры проводились на участках с горизонтальным радиусом 10 м, 50 м, 100 м, 600 м, продольными уклонами 18 ‰, 25 ‰. В данном эксперименте измеряли скорость движения транспортного потока на дорогах различных категорий и с разными параметрами.

В результате обработки данных наблюдений были получены следующие зависимости средней скорости движения от радиуса горизонтальной кривой:

При  $R < 100$  м

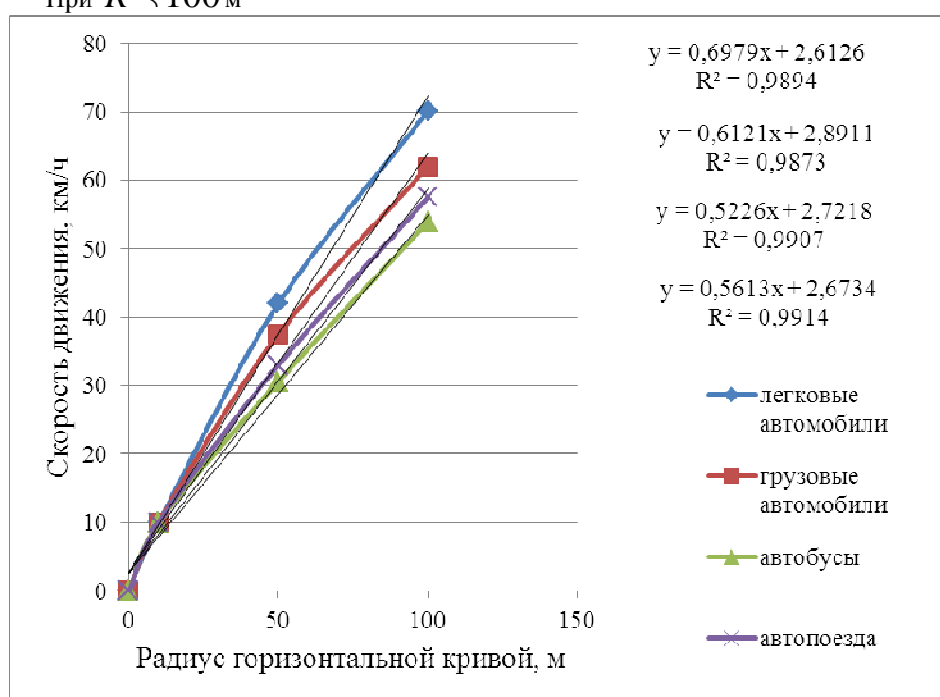


Рис. 7. Зависимость средней скорости движения от радиуса горизонтальной кривой

Где ряд 1 – зависимость для легковых автомобилей ;

Ряд 2 – зависимость для грузовых автомобилей ;

Ряд 3 – зависимость для автобусов ;

Ряд 4 – зависимость для автопоездов.

Общий вид уравнения: при радиусе горизонтальной кривой до 100м

$$V = (0,004 l^2 - 0,0863 l + 1,0018) R + (-0,0169 l^2 + 0,2793 l + 1,7161) \quad (2)$$

Где  $l$  - длина автомобиля, м ;

$R$  - радиус горизонтальной кривой, м.

Результаты проведенных исследований при  $100 < R < 600$  показаны на рисунке 8.

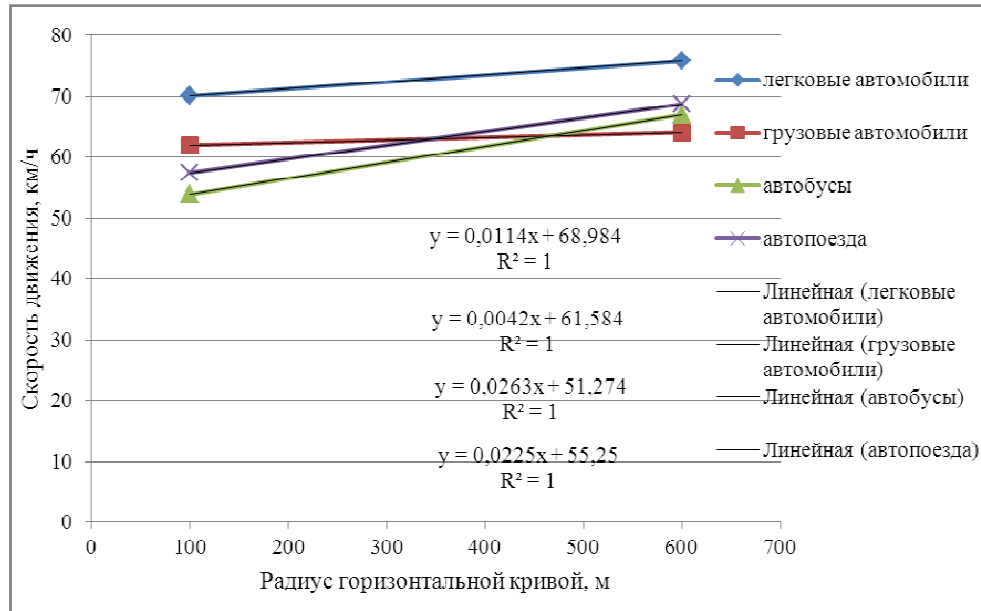


Рис. 8. Зависимость средней скорости движения от радиуса горизонтальной кривой более 100м

Где ряд 1 – зависимость для легковых автомобилей ;  
 Ряд 2 – зависимость для грузовых автомобилей ;  
 Ряд 3 – зависимость для автобусов ;  
 Ряд 4 – зависимость для автопоездов.

Конечным уравнением полученным на основе проведенного экспериментального исследования является:

$$V = \frac{V_0 - V_{100}}{500} (R - 100) , \quad (3)$$

Где  $V_{100}$  - скорость движения при  $R = 100$  м, км/ч, которая определяется на основе уравнения (2)

$V_0$  - средняя скорость свободного движения, км/ч.

Уменьшение средней скорости свободного движения от продольного уклона определенное на основе проведенных экспериментальных исследований :

$$V = V_0 - 283,79 i \quad (4)$$

Де  $V_0$  - скорость свободного движения, км/ч ;  
 $i$  - продольный уклон, в долях единицы.

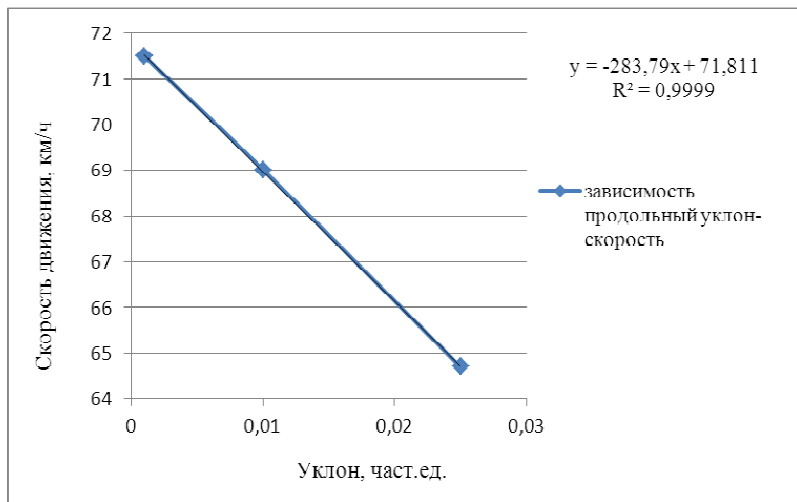


Рис. 9. Зависимость скорости движения транспортного потока от уклона

Средняя скорость на спусках приравнивается к средней скорости свободного движения :

$$V_i = V_{своб} \quad (5)$$

Среднюю скорость в зависимости от ровности покрытия определяют по формуле (6) или по графику рис. 10.

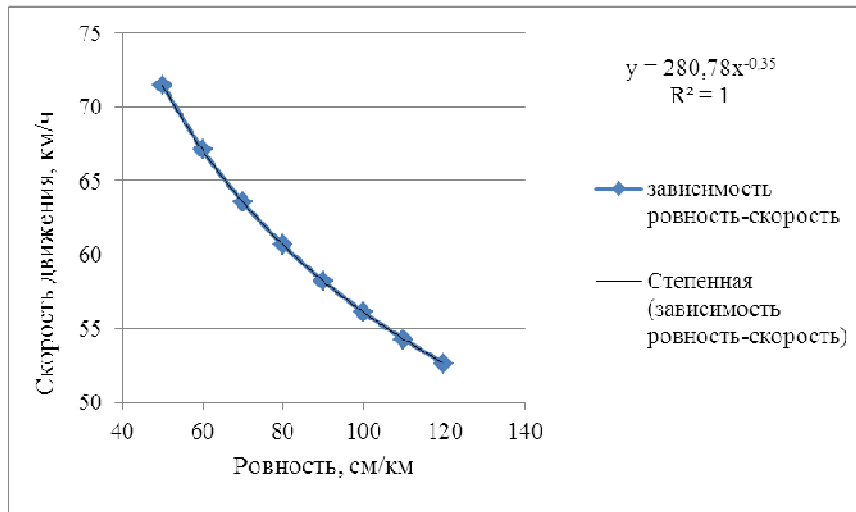


Рис. 10. Зависимость средней скорости движения показателя ровности дорожного покрытия

$$V_p = 280 \cdot P^{-0,35} \quad (6)$$

где  $p$  – показатель толчкомера, см/км.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ “ИНТЕНСИВНОСТЬ – СКОРОСТЬ”

Для получения этой функциональной зависимости проведено исследование. Исследования проводились на автомобильных дорогах различных категорий. Местами для исследования на автомобильной дороге выбираемые горизонтальные прямолинейные участки дорог с дорожной разметкой как осевой линии и края проезжей части. Последующая обработка проводилась на компьютере стандартными программами. Таким образом набирались данные по типам автомобилей.

Зависимость “интенсивность – скорость” определяется отдельно для легковых, грузовых автомобилей, автобусов и автопоездов длиной 12 м.

На основе данных проводился подбор кривой с помощью программы Excel и Mathcad.

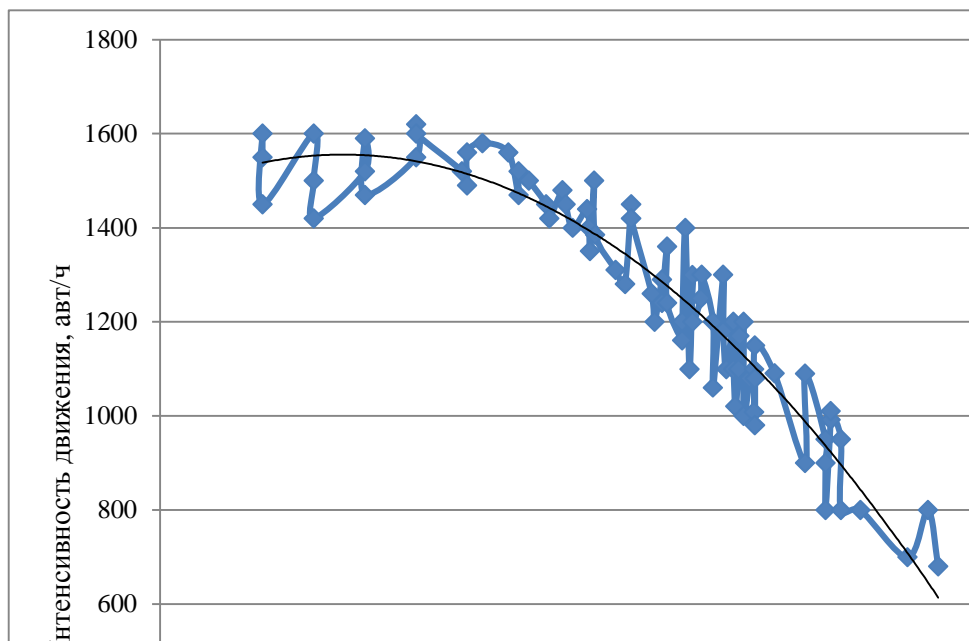


Рис.11. Зависимость “интенсивность-скорость” для легковых автомобилей

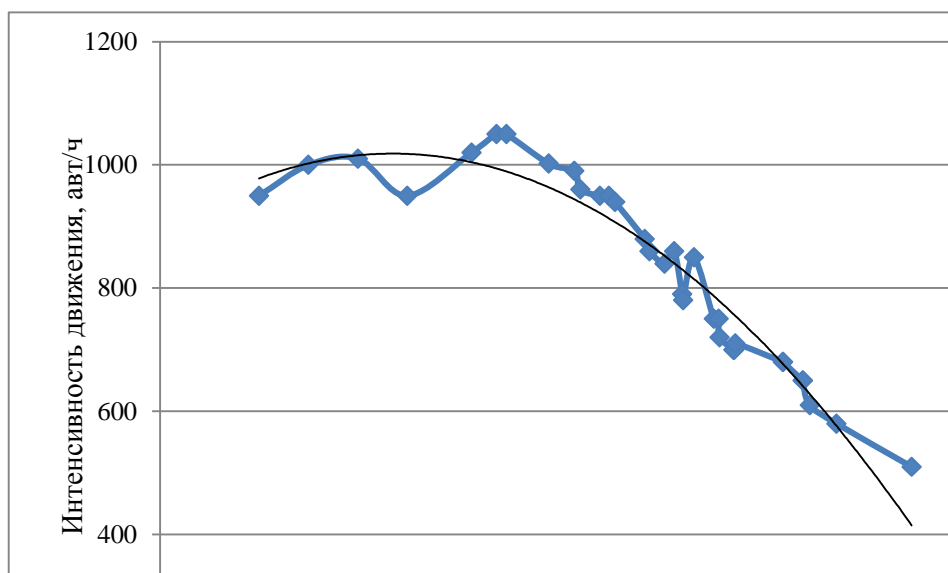


Рис.12. Зависимость “интенсивность-скорость” для грузовых автомобилей

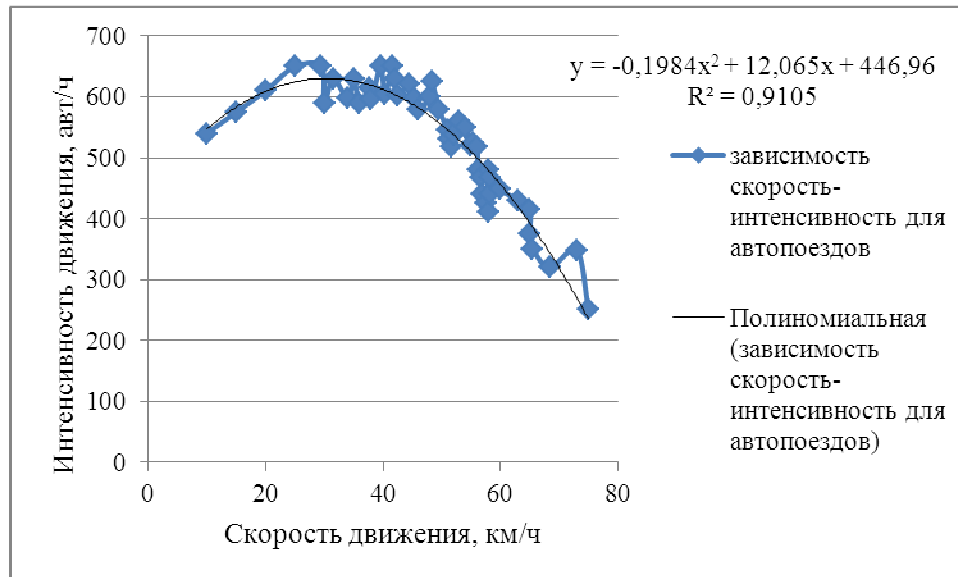


Рис.13. Зависимость “интенсивность-скорость” для автопоездов

Для получения уравнения зависимости интенсивность-скорость в общем виде нужно обработать полученные уравнения для различных типов автомобилей. Для этого найдем зависимость, которая описывала изменение первого коэффициента в зависимости от типа автомобиля. Аналогично для второго и третьего коэффициента.

Достоверность полученных результатов проверяем с помощью коэффициента корреляции.

Коэффициент корреляции указывает на тесноту связи между двумя случайными величинами и изменяется от -1 до +1. При прямой линейной зависимости, то есть когда с ростом значений  $x_i$  увеличиваются значения  $y_i$ ,  $\rho_{\sigma} = +1$ . При обратной линейной зависимости, то есть когда с ростом значений  $x_i$ , значения  $y_i$  уменьшаются  $\rho_{\sigma} = -1$ . Если  $x_i$  и  $y_i$  независимы, то  $\rho_{\sigma} = 0$ .

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r_{xy} = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (7)$$

После того, как установлен коэффициент корреляции, необходимо оценить, существенное отклонение полученного коэффициента корреляции от нуля.

Для решения данной задачи применялся способ Фишера.

Случайная величина  $Z$  подчиняется нормальному закону со средним отклонением  $\sigma_Z$ .

$$Z = \frac{1}{2} \lg \frac{1+r}{1-r}. \quad (8)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}. \quad (9)$$

Так как коэффициент корреляции  $r$  является случайной величиной, то необходимо по эмпирическому значению коэффициента корреляции  $r$  оценить теоретическое значение коэффициента  $\rho$ .

С надежностью  $\Phi(t) = 0,95$ ,  $t = 1,96$ , поэтому

$$Z - 1,96\sigma_z \leq Z_{ген} \leq Z + 1,96\sigma_z. \quad (10)$$

Результаты статистической обработки экспериментальных данных интервалов и скоростей движения представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты статистической обработки корреляции

Статистическая обработка корреляции	Для легковых автомобилей	Для грузовых автомобилей	Для автопоездов
$r$	0,91	0,86	0,74
$Z$	1,5126	1,2952	0,9536
$\sigma_z$	0,1601	0,2182	0,2500
$t$	1,96	1,96	1,96
$Z_{ген}$	1,1987	0,8675	0,4636
	1,8264	1,7229	1,4436
$\rho$	0,8333	0,7001	0,4330
	0,9495	0,9382	0,8944

Вывод: теоретические значения коэффициентов корреляции с вероятностью 0,95, лежат в доверительных интервалах.

В результате обработки данных наблюдений получили зависимость интенсивность-скорость с учетом состава транспортного потока в виде :

$$N = (-0,0026 l^2 + 0,0538 l - 0,4678) V^2 + (0,0277 l^2 - 0,1752 l + 10,182) V + (18,362 l^2 - 438,84 l + 3069) \quad (11)$$

где  $l$  - длина автомобиля, м ;  
 $V$  - средняя скорость движения, км/ч.

## 5. ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований получены значения скорости свободного движения на дорогах различных категорий и разной состава транспортного потока, разработан метод по расчету средней скорости движения транспортного потока при различном составе и различных дорожных условиях исследований, получено функциональную зависимость «интенсивность-скорость» для различного состава транспортного потока.

Полученные результаты позволяют рассчитать график средней скорости движения транспортного потока и на его основе рассчитать и построить график практической пропускной способности автомобильной дороги или ее участка.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Додух К.М., *Практическая пропускная способность полосы движения автомобильной дороги*, „Весник. Научно – технический сборник” 2013/28, ст. 164–169.
- [2] Додух К.М., *Практическая пропускная способность полосы движения автомобильной дороги*, International Scientific and Practical Internet Conference. World Science. September 22–24, 2014, UAE, Dubai 2014, ст. 38–41.
- [3] Дрю Д.Р., *Теория транспортных потоков и управление ими: Пер. с англ.*, Транспорт, Москва 1972.
- [4] Лобанов Е.М., Сильянов В.В., *Пропускная способность атомобильных дорог*, Транспорт, Москва 1970.
- [5] Мейсон Т.М., Смит У.С., Хард Ф.В., *Организация движения: Пер. с англ.*, Автотронсиздат, Москва 1960.
- [6] Пальчик А.Н., Додух К.М., *Практическая пропускная способность*, 15-я Международная научно-практическая конференция «Рынок услуг комплексных транспортных систем и прикладные проблемы логистики», Киев 2013, с. 158–160.
- [7] Пальчик А.Н., Неизвестная Н.В., Додух К.М., *Пропускная способность автомобильных дорог. Автомобильные дороги и дорожное строительство*, .Вып. 2014/91, С. 42–47.
- [8] Пальчик А.Н., *Транспортные потоки*, НТУ, Киев 2010, С. 171.

## PRACTICAL CAPACITY OF ROAD LANE

This paper presents a practical method for calculating capacity of lane highway. As a result of the increase in traffic on the roads of Ukraine, it was necessary to analyze traffic conditions and the development of measures to improve their work.

Most method of solving these problems is to analyze the traffic conditions on the basis of the schedule practical bandwidth road section. Based on it solved the problem of partial or complete its reconstruction.

Partial reconstruction of the mean increase capacity in certain areas or elements of the road. Practical capacity - the maximum possible traffic in a section of road per unit time in the specific road conditions.

Specific road conditions corresponds to the average speed of traffic flow and average speed of each transport stream corresponds to the practical capacity of the lane. The value of the practical capacity is used for: determining the required number of lanes on the roads, assessing traffic conditions on the roads, justifying the need for reconstruction of

the road or its individual sections, the calculation of the duration of the cycle of traffic lights traffic control vehicles at intersections and junctions, automatic leveling driving on the road, coordinated regulation of movement. Practical bandwidth ranges from the lowest value to the highest. The smallest practical bandwidth corresponds to a column of cars motion at an average speed of traffic flow. Most practical bandwidth corresponds to a column of cars motion with minimal interval (travel time dynamic dimension).

**Keywords:** practical capacity, traffic stripe, the composition of traffic flow, the average speed of traffic flow

**DOI:** 10.7862/rz.2015.mmr.12

Tekst złożono w redakcji: styczeń 2015

Przyjęto do druku: marzec 2015